

УДК 004.94:621.311.245:004.82

DOI:10.25729/ESI.2026.43.3.010

Разработка цифровой модели цифрового двойника ветровой электростанции с использованием онтологического моделирования

Шукин Никита Игоревич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, niksha14@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача интеграции разнородных математических моделей, применяемых при формировании цифровой модели цифрового двойника ветровой электростанции. Актуальность исследования определяется тем, что ветровая электростанция представляет собой не один объект, а сложную техническую систему, включающую ряд взаимосвязанных подсистем: ветровую установку, аэродинамический контур, механическую передачу, силовую электронику, систему передачи энергии, дизельную электростанцию, аккумуляторные батареи и потребителей. Для каждой из указанных подсистем в научной литературе используются различные классы моделей, отличающиеся составом исходных данных, уровнем детализации, расчетным шагом, принятыми допущениями, ограничениями и областью применимости. При разработке цифрового двойника такие модели должны быть не только реализованы в одном программном комплексе, но и согласованы между собой по смыслу параметров, единицам измерения, временным характеристикам, граничным условиям и правилам передачи результатов расчетов. Цель работы состоит в обосновании целесообразности применения онтологического подхода к интеграции моделей в цифровой модели цифрового двойника ветровой электростанции. Показано, что при отсутствии явной формализации предметной области усложнение цифрового двойника сопровождается дублированием данных, появлением неявных зависимостей между расчетными модулями, затруднением сопровождения программной системы и ростом затрат на развитие новой функциональности. Предлагается использовать онтологическую модель, как средство ограничения этих эффектов, задающее общий слой терминов, связей, ограничений и требований к данным. Целесообразно применять такую модель на этапе проектирования новой функциональности цифрового двойника, включая внедрение новых расчетных моделей, изменение компонентов визуализации, расширение базы данных и уточнение связей между подсистемами. Новизна подхода заключается в рассмотрении онтологии не только как средства представления знаний о предметной области, но и как инструмента снижения организационных и программно-инженерных рисков при интеграции моделей цифрового двойника. Отдельное внимание уделено тому, что онтологическая модель позволяет фиксировать знания специалистов в формализованном виде и тем самым снижать зависимость проекта от ограниченного числа сотрудников, одновременно владеющих программной инженерией, математическим моделированием и спецификой энергетических объектов. В работе обосновывается, что использование онтологического подхода может способствовать повышению согласованности компонентов цифровой модели, снижению вероятности ошибок при обмене данными между расчетными модулями и упрощению последующего развития цифрового двойника ветровой электростанции.

Ключевые слова: цифровой двойник, ветровая электростанция, математическое моделирование, онтологическое моделирование, интеграция моделей

Цитирование: Шукин Н.И. Разработка цифровой модели цифрового двойника ветровой электростанции с использованием онтологического моделирования / Н.И. Шукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 3(43). – С. 119-133. – DOI:10.25729/ESI.2026.43.3.010.

Введение. Развитие цифровых двойников энергетических объектов требует перехода от отдельных библиотек расчетных функций к комплексным цифровым моделям, которые способны отражать состав объекта, его режимы, состояние оборудования, внешние воздействия и управленческое воздействие. Для ветровой электростанции производство электрической энергии зависит от стохастического ветрового потока, состояния механических узлов ветровой установки, характеристик генератора и преобразователей, режима аккумуляторных батарей, участия резервной дизельной электростанции и графика потребления. Поэтому цифровой двойник ветровой электростанции не может быть построен как одна универсальная модель. Он должен объединять набор моделей разного назначения и разной природы.

Научная литература демонстрирует значительное количество публикаций по моделированию аэродинамики ветровых установок, кривых мощности, механики привода, электрических машин, силовой электроники, систем накопления энергии, дизель-генераторных установок и нагрузок [1–10]. Однако при переходе от отдельных моделей к цифровому двойнику возникает иной уровень задачи. Разработчику требуется согласовать модели между собой: определить, какие параметры являются общими, какие данные передаются между модулями, какие величины должны храниться в информационной модели, а какие вычисляются по требованию. При отсутствии формального описания предметной области эти связи часто фиксируются в коде, технических комментариях или в неформальных договоренностях между специалистами.

Такой способ разработки допустим на этапе раннего прототипирования, но становится рискованным при расширении цифрового двойника. В него добавляются новые модели, новые источники данных, новые сценарии расчета, новые средства визуализации, новые возможности по управлению объектом и новые требования к мониторингу. По мере роста функциональности увеличивается вероятность появления дублирующихся сущностей, противоречивых трактовок параметров, несовместимых единиц измерения и повторной реализации одинаковых расчетов в разных подсистемах. Для программных систем, постоянно взаимодействующих с изменяющейся предметной областью, эта проблема хорошо согласуется с законами эволюции программного обеспечения: без специальных мер сложность системы возрастает, а ее качество со временем снижается [11, 12].

В статье предлагается рассматривать онтологический подход, как средство интеграции математических моделей в цифровую модель цифрового двойника ветровой электростанции. В таком подходе онтология задает не только словарь предметной области, но и структуру согласования расчетных моделей, данных, технических требований и программных компонентов. Это позволяет переносить часть неявных знаний экспертов из неформального общения и документации в формализованную модель, доступную для анализа, повторного использования и контроля согласованности.

1. Модели подсистем ветровой электростанции. Ветровая электростанция включает несколько групп объектов, которые различаются по физической природе, временным масштабам и целям моделирования. При проектировании цифрового двойника важно не сводить эти модели к единой детализации. Наоборот, цифровая модель должна поддерживать разные уровни описания: от расчетов годовой выработки по кривой мощности до динамического моделирования переходных процессов в электрической части.

Наиболее общая расчетная зависимость для ветровой установки:

$$P = \xi \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (1)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра, R – радиус ротора, ρ – плотность воздуха, V – скорость ветра, $\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора, $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора. Эта формула не использует аэродинамическую модель, но задает связь между внешними условиями и механическим входом ветровой установки. В прикладных расчетах она дополняется моделями ветрового профиля, турбулентности, сдвига и поворота ветра, влияния плотности воздуха, ограничений по пусковой, номинальной и предельной скорости [1, 2].

Внешние части ветровой установки – ротор, лопасти, ступица, гондола, система ориентации и башня – обычно моделируются через аэродинамические, прочностные и кинематические зависимости. Для задач энергетического расчета часто достаточно паспортной или параметрической кривой мощности, отражающей связь скорости ветра и электрической мощности. Для задач диагностики, управления и ресурса оборудования требуются более детальные модели: распределение нагрузок по лопасти, изгибные и

крутильные колебания, воздействие турбулентности, состояние системы регулирования угла лопасти и ориентации ротора по направлению ветра. Исследование [2] показывает, что кривые мощности зависят не только от конструктивных параметров ветровой установки, но и от внешних условий: турбулентности, плотности воздуха, сдвига и поворота ветра. Следовательно, цифровой двойник должен хранить не только паспортные параметры агрегата, но и описание условий, при которых они применимы.

Механическая часть ветровой установки связывает аэродинамический момент ротора с электромагнитным моментом генератора. В простейшем случае она описывается уравнением движения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_{\text{мех}}. \quad (2)$$

где J – осевой момент инерции вращающихся масс роторов генератора и турбины, ω – угловая скорость, M – момент, действующий на ротор генератора, $M_{\text{мех}}$ – момент сопротивления механизма, присоединенного к ротору двигателя.

Для ветровых установок с редуктором требуется учет передаточного отношения, упругости вала, демпфирования и динамики редуктора. Для прямоприводных установок акцент переносится на генератор и силовой преобразователь, поэтому механическая модель является связующим звеном между аэродинамикой и электрической частью, а не отдельным расчетом, который можно изолировать от остальных подсистем.

Ветрогенератор и электрическая часть могут быть представлены моделями асинхронного генератора, генератора двойного питания, синхронного генератора с постоянными магнитами, выпрямителя, инвертора, звена постоянного тока, трансформаторов и устройств защиты. В работах по динамическому моделированию ветровых установок показано, что даже обобщенная модель переменнo скоростной установки должна включать блоки аэродинамики, привода, генератора, электрического управления и сетевого интерфейса [3]. Для генераторов с постоянными магнитами важны модели преобразователя, управления активной и реактивной мощностью, поддержания напряжения звена постоянного тока и режимов максимального отбора мощности [4, 5].

Передача энергии от ветровой установки к потребителю или внешней сети описывается моделями кабельных линий, трансформаторов, коммутационной аппаратуры, потерь, ограничений по напряжению, частоте и реактивной мощности. Для изолированных систем и гибридных микросетей этот блок нельзя опускать, поскольку малые изменения нагрузки или генерации могут приводить к отклонению частоты и напряжения. В цифровом двойнике модель передачи энергии должна быть связана с информацией о топологии схемы, состояниях оборудования в схеме, допустимых токах, настройках защит и составе работающего оборудования.

Дизельная электростанция обычно рассматривается как резервный или балансирующий источник в составе автономной ветродизельной системы. Ее модель включает дизельный двигатель, синхронный генератор, регулятор скорости, регулятор возбуждения, ограничения по минимальной нагрузке, расход топлива, время пуска и режимы совместной работы с ветровой генерацией. В классических и современных работах по ветродизельным и ветродизель-аккумуляторным системам дизельный генератор рассматривается не только как источник мощности, но и как элемент поддержания баланса между генерацией и потреблением [6, 7]. Поэтому в цифровой модели необходимо фиксировать не только установленную мощность дизельной электростанции, но и логику включения, ограничения экономичной работы и связь с аккумуляторами.

Аккумуляторные батареи выполняют функции сглаживания ветровой генерации, покрытия кратковременного дефицита, накопления избытков энергии и уменьшения числа

пусков дизельной электростанции. Их модели различаются по уровню детализации: от простого энергетического баланса до эквивалентных электрических схем с учетом внутреннего сопротивления, поляризации, напряжения холостого хода, температуры, состояния заряда и деградации. В динамических расчетах часто используется переменное состояние заряда аккумуляторной батареи, которое связывает ток батареи, номинальную емкость, эффективность заряда и разряда. Обобщенная запись может быть представлена как:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{Q_{max}} \int_{t_0}^t I(t) dt. \quad (3)$$

где $SOC(t_0)$ – начальный уровень заряда в момент времени t_0 , Q_{max} – номинальная емкость аккумуляторной батареи, $I(t)$ – ток батареи в момент времени t .

Работы по валидации динамических моделей аккумуляторов показывают, что даже относительно простые модели могут быть пригодны для имитационного моделирования при корректном определении параметров по данным производителя и испытаний [8].

Потребители в составе автономной или локальной ветровой электростанции моделируются не только через суммарный график нагрузки. Для оценки статических режимов используют модели постоянной мощности, постоянного тока, постоянного сопротивления и их комбинации. Для динамических расчетов учитывают асинхронные двигатели, электронные преобразователи, нагревательные нагрузки, пусковые токи и восстановление нагрузки после провалов напряжения. Стандартные подходы к моделированию нагрузки в расчетах потокораспределения и динамической устойчивости предлагают представлять нагрузку как набор статических и динамических компонентов [9, 10]. Следовательно, в цифровом двойнике потребитель должен описываться не только величиной спроса, но и типом нагрузки, приоритетом отключения, допустимыми отклонениями качества электроэнергии и характером изменения во времени.

2. Цифровая модель цифрового двойника. Цифровой двойник отличается от обычной имитационной модели тем, что виртуальное представление объекта тесно связано с реальным объектом. В литературе цифровой двойник рассматривается, как модель сложной физической системы, которая использует данные, физические и статистические модели для анализа, прогнозирования и поддержки управления [13–16]. Для ветровой электростанции это означает, что цифровая модель должна объединять модели подсистем не как справочник, а как взаимосвязанная и настраиваемая система расчета.

В цифровой модели цифрового двойника можно выделить несколько уровней. Первый уровень – интерфейсы связи с информационными моделями, то есть принятый для всех участников разработки подход к реализации связей с компонентами цифровой тени цифрового двойника (цифровая тень представляет собой систему связей и зависимостей, приближенно описывающих поведение реального объекта/продукта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных, которые получают от реального объекта/продукта при помощи большого количества датчиков и технологий промышленного интернета, изменение физического объекта/продукта приводит к изменению его цифровой тени, но не наоборот [17]).

Цифровая тень содержит сведения о составе объекта: ветровые установки, дизельные генераторы, аккумуляторные батареи, трансформаторы, устройства управления, датчики, потребители и связи между ними. Второй уровень – расчетный. На нем размещаются математические модели, алгоритмы расчета необходимых характеристик, прогнозирования, оценки состояния и оптимизации управления. Третий уровень – сценарный. Он описывает условия применения моделей: расчет годовой выработки, моделирование переходного процесса, анализ отказа, подбор мощности батарей, оценка топливного расхода дизельной

электростанции. Четвертый уровень – интерфейсный. Он обеспечивает визуализацию состояния, результатов расчетов и рекомендаций.

Проблема состоит в том, что эти уровни обычно разрабатываются разными специалистами. Математик описывает расчетную зависимость и набор параметров. Программист проектирует программный код и API. Инженер-энергетик контролирует корректность допущений. Специалист по визуализации определяет, какие значения должны отображаться пользователю. Если общая модель предметной области отсутствует, каждый участник команды создает собственное представление объекта. Например, скорость ветра может существовать, как поле в таблице погодных данных, как параметр функции расчета мощности, как ось графика, как входной сигнал модели управления и как атрибут в окне визуализации. При неформальном согласовании высока вероятность того, что эти представления начнут расходиться по размерности и временному шагу.

Для цифрового двойника ветровой электростанции особенно важна прозрачность данных. Если расчет коэффициента используемой установленной мощности (КИУМ) или прогноза выработки опирается на скорость ветра, разработчик должен понимать, откуда получены данные, какой высоте они соответствуют, как обработаны и какая модель ветровой установки использована. Аналогично для батареи требуется знать, является ли состояние заряда аккумуляторной батареи измеренной величиной, результатом модели или прогнозным значением. Для дизельной электростанции нужно различать установленную мощность, доступную мощность, минимально допустимую нагрузку и фактическую нагрузку. Эти различия очевидны для предметного специалиста, но не всегда очевидны в структуре программной системы.

Таким образом, цифровая модель цифрового двойника должна выполнять интеграционную функцию. Она связывает сущности предметной области, параметры моделей, источники данных, сценарии расчета и программные модули. Если эта функция реализуется только на уровне кода, то знания оказываются распределенными между исходными файлами, базой данных, документацией и опытом отдельных сотрудников. При расширении проекта такая организация становится причиной ускоренного накопления хаоса в программной системе.

3. Сложности интеграции моделей при программной реализации. Интеграция моделей в цифровом двойнике отличается от простой сборки модулей. Каждый расчетный модуль имеет собственную область применимости, набор входов и выходов, ограничения и требования к качеству данных. При этом модули должны работать совместно: аэродинамическая модель формирует механическую мощность, механическая модель передает момент генератору, электрическая модель рассчитывает мощность на шинах, модель батареи компенсирует дисбаланс, дизельная электростанция включается при дефиците, а модель нагрузки задает спрос. Даже если каждая модель по отдельности корректна, цифровой двойник может работать неверно из-за ошибок согласования между ними.

К типовым проблемам относятся: дублирование данных в разных подсистемах; неодинаковые имена и разные единицы измерения для одних и тех же величин; неявные преобразования данных; отсутствие связи между параметром в техническом задании и его реализацией в коде; смешение измеренных, расчетных и прогнозных значений; несогласованное обновление справочников оборудования; отсутствие единого описания ограничений. Например, паспортная кривая мощности может храниться в расчетном модуле как массив точек, в базе данных как таблица, в интерфейсе как график, а в документации как изображение. Если при обновлении оборудования изменится только одна копия, цифровой двойник начнет выдавать противоречивые результаты.

Отдельная проблема связана с развитием цифрового двойника. На начальном этапе команда может реализовать расчет выработки одной ветровой установки. Затем добавляется учет нескольких установок, батарей, дизельной электростанции, потребителей, сценариев аварий, визуализации, импорта данных SCADA, прогноза погоды и оптимизации режимов. Каждая новая функция требует новых сущностей и связей. Если архитектура не содержит явного слоя предметной семантики, разработчики вынуждены искать нужные значения в существующем коде, повторно согласовывать смысл терминов и вручную контролировать совместимость модулей.

В терминах программной инженерии такая ситуация приводит к росту сложности, связанности и стоимости изменений. Закон возрастающей сложности программной эволюции указывает, что изменяемые программные системы со временем становятся сложнее, если специально не выполнять работы по снижению сложности [11, 12]. Цифровой двойник энергетического объекта относится именно к таким системам: он должен изменяться вместе с объектом, данными, расчетными методами и требованиями пользователей. Поэтому задача состоит не в том, чтобы полностью исключить рост сложности, а в том, чтобы сделать его управляемым.

Управляемость может быть достигнута за счет переноса части знаний в формализованный слой. В цифровом двойнике таким слоем может выступать онтология предметной области, связанная с онтологиями сопутствующих объектов, онтологией информационной модели и онтологией математической модели. Эти онтологии позволяют зафиксировать, что «скорость ветра на высоте ступицы», «скорость ветра на высоте измерения», «среднегодовая скорость ветра» и «входной параметр кривой мощности» являются связанными, но не тождественными сущностями. Аналогично можно различать установленную мощность ветровой установки, доступную мощность, фактическую мощность и прогнозную мощность. Такое различие снижает вероятность неявной подмены понятий при разработке.

4. Онтологический подход к интеграции моделей. Онтология в рассматриваемой задаче понимается как формализованное описание классов объектов, их свойств, отношений, ограничений и правил интерпретации данных. Языки семейства Semantic Web, включая OWL, ориентированы на представление классов, свойств, индивидов и значений данных, а также на проверку согласованности и вывод неявных знаний [18]. В рамках цифрового двойника ветровой электростанции онтология может использоваться не только как справочник терминов, но и как проектный артефакт, связывающий предметную область с архитектурой программной системы.

Предлагаемый подход включает несколько взаимосвязанных онтологических слоев. Предметная онтология описывает физические объекты: ветровая установка, ротор, лопасть, генератор и так далее. Онтология математической и информационной моделей фиксирует, какие модели существуют, какие входные и выходные параметры они используют и откуда их берут, для каких задач применимы и какие допущения имеют. Онтология сопутствующих объектов может подразделяться на онтологию сценариев, описывающую расчет выработки, оптимизацию расположения, моделирование переходного процесса, прогнозирование, диагностику, расчет энергобаланса, оценку экономичности и на онтологию программных компонентов, которая связывает сущности других онтологий с расчетными сервисами, API и интерфейсами.

Практический смысл такого разделения состоит в том, что при добавлении новой модели команда не начинает с обсуждения структуры таблиц или сигнатуры функции. Сначала определяется место модели в онтологии: какие объекты она описывает, какие параметры требует, какие результаты возвращает, какие данные являются измеренными, а какие

расчетными, какие ограничения должны выполняться. После этого проектируются изменения в базе данных, расчетном модуле и интерфейсе. С учетом этого онтология используется на ранней стадии – при подготовке технического задания и проектировании новой функциональности. Время разработки при этом не обязательно существенно увеличивается: часть работы, которая обычно выполняется в виде неформальных обсуждений и исправлений после ошибок интеграции, переносится в формализованную проектную модель.

Онтологический подход особенно полезен при интеграции моделей с разным временным шагом. Например, метеорологические данные могут иметь часовой шаг, модель переходных процессов – миллисекундный, расчет годовой выработки – месячный или годовой шаг, а диспетчерская визуализация – шаг обновления в несколько секунд. Онтология не заменяет механизмы интерполяции и агрегации, но позволяет явно описать, какой временной масштаб относится к конкретной модели и какие преобразования допустимы. Это важно для предотвращения ошибок, когда среднее значение используется там, где нужна мгновенная величина, или прогнозное значение смешивается с фактическим измерением.

Еще один эффект связан с повторным использованием знаний. Если онтология содержит описание типовых объектов ветровой электростанции и их параметров, то при разработке нового сценария не требуется заново согласовывать базовые термины. Например, сценарии «оценка КИУМ», «подбор емкости батарей» и «оценка доли дизельной генерации» используют разные расчетные модели, но опираются на общий набор сущностей: ветровая установка, потребитель, аккумуляторная батарея, дизельный генератор, временной ряд ветра, график нагрузки, баланс мощности. Это снижает риск появления несовместимых моделей данных для близких задач.

В литературе, рассматривающей требования к программному обеспечению, онтологии предлагаются как средство поддержки выявления, спецификации, анализа, проверки полноты и непротиворечивости требований [19–21]. Для цифрового двойника это особенно существенно, поскольку техническое задание должно описывать не только пользовательские функции, но и смысл расчетных данных. При отсутствии онтологии требования вида «добавить модель аккумуляторной батареи» или «добавить визуализацию мощности» остаются слишком общими. Онтология позволяет уточнить, какие параметры батареи обязательны, какие состояния допустимы, какие данные должны поступать из датчиков, какие – рассчитываться, какие значения отображаются пользователю и какие проверки выполняются перед расчетом. В таблице 1 представлены этапы использования онтологии при проектировании новой функциональности цифрового двойника.

Таблица 1. Этапы использования онтологии при проектировании новой функциональности цифрового двойника

Этап	Роль онтологии	Результат для разработки
Формулирование задачи	Уточнение объекта, сценария, входов, выходов и ограничений	Техническое задание без неоднозначных терминов
Выбор модели	Сопоставление модели с объектами, параметрами и областью применимости	Понятный состав расчетного модуля и требуемых данных
Проектирование данных	Привязка параметров к источникам, единицам измерения и временным рядам	Меньше дублирования в базе данных и API
Реализация	Согласование классов, таблиц, сервисов и интерфейсов с общей семантикой	Снижение числа интеграционных ошибок
Развитие и сопровождение	Контроль связей между новыми и существующими сущностями	Более управляемое изменение цифрового двойника

5. Практические предпосылки применения онтологий. Онтологический подход не является только академическим инструментом. Крупные цифровые платформы и промышленные проекты уже используют онтологии, семантические модели и графы знаний для интеграции данных, описания активов и построения цифровых решений. В документации Palantir Foundry онтология определяется, как операционный слой организации, соединяющий цифровые активы платформы с реальными объектами, включая оборудование, продукты, процессы и действия [22]. В Azure Digital Twins компания Microsoft предлагает отраслевые DTDL-онтологии, разработанные совместно с предметными экспертами и предназначенные для уменьшения повторной разработки моделей и упрощения решений [23]. Компания DNV предлагает услуги построения энергетических онтологий и указывает, что такие модели позволяют автоматически проверять качество данных и соответствие требованиям [24]. В рамках OntoCommons описан промышленный пример Siemens, где создана библиотека онтологий для доменов производства и автоматизации, а также преобразования промышленных стандартов [25].

Приведенные выше примеры не означают, что для цифрового двойника ветровой электростанции следует напрямую использовать готовую корпоративную онтологию. Их значение состоит в другом: промышленная разработка все чаще приходит к необходимости отдельного семантического слоя, который связывает данные, модели, реальные объекты и пользовательские процессы. Для энергетических объектов это требование имеет принципиальное значение, поскольку ошибки в расчетных моделях могут приводить к существенным техническим и экономическим последствиям. Дополнительную сложность создает большое число взаимосвязанных параметров, а также необходимость согласованной работы специалистов разных профилей – инженеров, математиков, разработчиков программного обеспечения и эксплуатационного персонала.

При проектировании цифрового двойника ветровой электростанции онтология может стать центральным элементом технического задания. В ней фиксируется, какие объекты существуют в системе, какие атрибуты обязательны, какие модели допускается применять, какие данные должны быть сохранены, какие результаты должны отображаться и какие ограничения должны контролироваться. Это позволяет уменьшить разрыв между языком предметного специалиста и языком программной реализации. Программист получает не абстрактное описание «рассчитать режим батареи», а формализованный набор сущностей: батарея, емкость, напряжение, допустимая мощность заряда, допустимая мощность разряда, КПД, температурный диапазон, связь с балансом мощности и условия включения дизельного генератора.

За счет этого онтология не обязательно увеличивает продолжительность разработки. Напротив, при росте цифрового двойника она может сокращать время согласования новых функций, потому что команда работает с уже заданным набором понятий и связей. Дополнительные затраты возникают на этапе первичного построения и сопровождения онтологии. Однако эти затраты компенсируются уменьшением числа неявных решений, повторных обсуждений и исправлений, связанных с ошибками интеграции моделей. Для прототипа с одной моделью такая выгода может быть небольшой, но для цифрового двойника, который должен объединять аэродинамику, механику, электрическую часть, накопители, дизельную генерацию и потребителей, она становится принципиальной.

6. Эффективность цифрового двойника при использовании онтологий для интеграции моделей. Эффективность цифрового двойника ветровой электростанции следует оценивать по двум группам показателей. Первая группа связана с энергетическим и эксплуатационным эффектом: повышение точности оценки выработки, снижение простоев, улучшение планирования обслуживания, оптимизация участия батарей и дизельной

электростанции, уменьшение топливного расхода и повышение наблюдаемости объекта. Вторая группа связана с разработкой: сокращение числа интеграционных ошибок, уменьшение дублирования данных, ускорение добавления новых моделей и новой функциональности и снижение зависимости от уникальных сотрудников.

Практические примеры применения цифровых решений в ветроэнергетике показывают значимость такого направления. GE при запуске концепции Digital Wind Farm указывала, что сочетание сенсоров, сетей данных и аналитики может повысить годовую выработку ветровой электростанции до 20% за счет настройки турбин под конкретные условия эксплуатации [26]. Обобщенные оценки для цифровых двойников в промышленной разработке показывают, что такие технологии способны сокращать время вывода продукта на рынок до 50%, повышать качество продукции и создавать дополнительные источники дохода при правильной организационной и технологической реализации [27].

В нашем случае эффективность предлагаемого подхода целесообразно рассматривать применительно к процессам проектирования, разработки и сопровождения цифрового двойника, а не связывать непосредственно с увеличением выработки электроэнергии или изменением эксплуатационных показателей ветровой электростанции. Энергетический эффект определяется точностью используемых математических моделей, алгоритмами управления и качеством исходных данных. Онтологическое моделирование оказывает влияние на другой уровень системы – на согласованность знаний, данных и программных компонентов, посредством которых эти модели объединяются в цифровом двойнике.

В основу интеграции положена система взаимосвязанных онтологий, включающая онтологию моделируемого объекта, онтологию информационной модели, онтологию математической модели и онтологию сопутствующих объектов. Их концептуальные связи представлены на рисунке 1. Онтология моделируемого объекта содержит базовое описание ветровой электростанции, ее подсистем, оборудования, параметров и отношений между объектами. Она служит основанием для формирования специализированных онтологий информационной и математической моделей. Эти онтологии описывают моделируемый объект и используют определенные в предметной онтологии параметры.

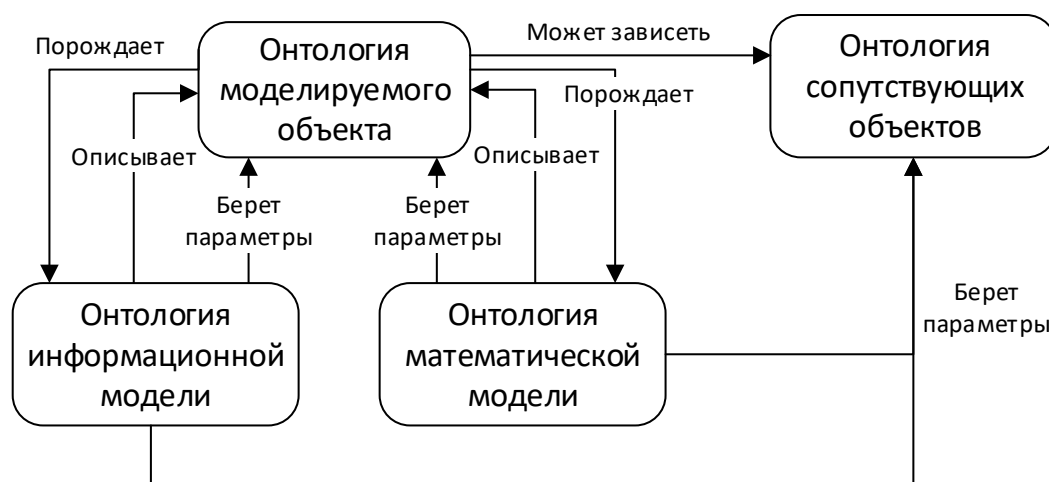


Рис. 1. Концептуальная структура связей между онтологиями цифрового двойника ветровой электростанции

Онтология сопутствующих объектов предназначена для тех фрагментов знаний, которые необходимы для расчета и программной реализации, но не относятся непосредственно к конструктивному составу ветровой электростанции. К ним могут быть отнесены погодные характеристики, требования к программному продукту, элементы архитектуры цифрового двойника, сценарии расчетов, способы визуализации и правила обмена данными. Предметная

онтология может зависеть от этих описаний, а онтологии математической и информационной моделей получают из них необходимые параметры. Например, модель мощности ветровой установки использует скорость ветра и плотность воздуха, которые описываются в онтологии погодных характеристик; одновременно информационная модель должна фиксировать источник этих данных, высоту измерения, временной шаг и единицы измерения.

Такое разделение позволяет не объединять все сведения в одну чрезмерно крупную онтологию. Каждый компонент сохраняет собственное назначение, но остается связанным с другими через явно заданные отношения. Онтология математической модели описывает входные и выходные параметры, расчетные зависимости, ограничения, допущения и область применимости модели. Онтология информационной модели определяет, в каком виде соответствующие параметры представлены в базе данных, программных интерфейсах и цифровой тени. Онтология моделируемого объекта задает предметный смысл этих параметров, а онтология сопутствующих объектов уточняет внешние условия и требования. В результате один параметр может быть прослежен от понятия предметной области до источника данных и конкретного расчетного модуля.

Практический эффект такой структуры проявляется прежде всего в снижении вероятности семантических ошибок. Без формального описания одна и та же величина может быть представлена в разных компонентах под различными именами либо, напротив, одним термином могут обозначаться разные величины. Для скорости ветра необходимо различать скорость на высоте измерения, скорость на высоте ступицы, усредненное и мгновенное значения. Для мощности – установленную, доступную, фактическую и прогнозную мощности. Фиксация этих различий в онтологии уменьшает риск того, что расчетный модуль получит формально допустимое, но содержательно неверное значение.

Другой эффект связан с проектированием новой функциональности. При добавлении математической модели сначала определяется, какой объект она описывает, какие параметры получает из онтологии моделируемого объекта и сопутствующих онтологий, какие результаты формирует и где они должны быть представлены в информационной модели. После этого могут проектироваться структура хранения данных, программный интерфейс и визуализация. Такой порядок дает возможность выявить недостающие или дублирующиеся сущности до реализации программного кода. Онтология в данном случае выступает не дополнительной документацией, создаваемой после разработки, а проектным артефактом, используемым при подготовке требований и согласовании решений между инженерами, математиками и программистами.

Формализованные связи могут использоваться и для частичной автоматизации разработки. На основе онтологии информационной модели возможно формирование структуры таблиц базы данных, классов передачи данных и правил проверки значений. Связи с онтологией математической модели позволяют находить параметры, необходимые для конкретного расчета, проверять наличие источников данных и формировать описание интерфейса расчетного модуля. Представление онтологии в форме графа знаний может применяться при оформлении документации цифрового двойника, поиска зависимостей и анализа последствий изменений. При замене модели или добавлении нового показателя становится возможным определить, какие сущности, расчеты, таблицы и компоненты визуализации связаны с изменяемым элементом.

Эффективность онтологической интеграции может оцениваться по показателям, непосредственно связанным с развитием программного продукта. К ним относятся количество выявленных дублирующихся параметров, доля параметров с явно заданными единицами измерения, источниками и временными характеристиками, число несогласованных связей между моделями и между программными компонентами, продолжительность подключения

нового программного модуля, объем изменений в существующих компонентах и полнота трассировки требований до данных и программной реализации.

Апробация предложенной структуры на примере цифрового двойника ветровой электростанции показала возможность связать описание объекта с параметрами математических моделей и элементами информационной модели. В частности, параметры ветрового потока, характеристики ветровой установки и коэффициенты эффективности могут быть представлены, как связанные сущности, используемые одновременно в расчетах и в структурах хранения данных. Это создает основу для согласованного расширения цифрового двойника при добавлении новых моделей, источников информации и средств визуализации. Следовательно, основным результатом применения онтологического подхода является не устранение необходимости в предметных специалистах, а сохранение и структурирование их знаний в форме, пригодной для совместного использования, проверки и повторного применения.

Интеграция через онтологические модели повышает управляемость развития цифрового двойника за счет явного разделения и согласования предметных, математических, информационных и сопутствующих знаний. Ожидаемый эффект выражается в уменьшении дублирования данных, повышении трассируемости параметров, снижении числа интеграционных ошибок и сокращении объема повторного согласования при изменении программной системы. Количественная оценка этих эффектов требует отдельного вычислительного и программно-инженерного эксперимента, однако представленная структура определяет показатели и условия, необходимые для его проведения.

Заключение. В статье рассмотрена задача интеграции математических моделей, необходимых для построения цифровой модели цифрового двойника ветровой электростанции. Показано, что ветровая электростанция требует совместного учета аэродинамических, механических, электрических, энергетических, аккумуляторных, дизель-генераторных и нагрузочных моделей. Каждая из этих моделей имеет собственные входные данные, выходные величины, ограничения и область применимости, поэтому их объединение в цифровом двойнике является самостоятельной программно-инженерной задачей. При отсутствии явного семантического слоя развитие цифрового двойника приводит к дублированию данных, расхождению терминов, неявным зависимостям между модулями и ускоренному росту сложности программной системы. Предложено использовать для интеграции моделей онтологический подход, при котором знания о составе объекта, параметрах, моделях, задачах и программных компонентах фиксируются в формализованной модели. Такой подход целесообразно применять уже на этапе подготовки технического задания и проектирования новой функциональности, включая внедрение новых расчетных моделей и средств визуализации. Онтология позволяет снизить зависимость проекта от уникальных специалистов, одновременно владеющих математическим моделированием и программной инженерией, поскольку часть их знаний сохраняется в общей модели и становится доступной для разных участников команды. В результате онтологическая интеграция может рассматриваться, как средство повышения воспроизводимости, сопровождаемости и экономической устойчивости разработки цифрового двойника ветровой электростанции.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН № FWEU-2026-0007. Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. Людмиле Васильевне Массель за научное руководство, ценные консультации и поддержку, оказанную при выполнении исследования.

Список источников

1. Burton T., Sharpe D., Jenkins N. et al. Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, 2011, 617 p.
2. Yves-Marie S.-D., Romain B., Malte J. et al. A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions. *Renewable Energy*, 2020, pp. 754-768, DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.123.
3. Slootweg J., Haan S.W.H., Polinder H., Kling W.L. General model for representing variable-speed wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE Power Engineering Review*, 2002, vol. 18, pp. 144-151, DOI: 10.1109/MPER.2002.4311816.
4. Chinchilla M., Arnalte S., Burgos J. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, pp. 130-135, DOI: 10.1109/TEC.2005.853735.
5. Krause P., Wasynczuk, Sudhoff S. et al. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed, Hoboken: John Wiley & Sons, 2013, 680 p.
6. Бельский А.А. Оптимизация параметров автономного ветродизельного комплекса, эксплуатируемого на горных территориях / А.А. Бельский, Е.А. Емельянов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. – № 1. – с. 69-80. – DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-69-80.
7. Djohra S., Koussa M., Rennane A. et al. Hybrid diesel-wind system with battery storage operating in standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*, 2017, DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.127.
8. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 289-298, DOI: 10.3390/wevj3020289.
9. Гуревич Ю.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова // М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 248 с.
10. Arif A., Wang Z., Wang J. et al. Load modeling – a review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 5986–5999, DOI: 10.1109/TSG.2017.2700436.
11. Lehman M.M. Programs, life cycles, and laws of software evolution. *Proceedings of the IEEE*, 1980, vol. 68, no. 9, pp. 1060–1076, DOI: 10.1109/PROC.1980.11805.
12. Levén W., Broman H., Besker T., Torkar R. The broken windows theory applies to technical debt. *Empirical Software Engineering*, 2024, DOI: 10.1007/s10664-024-10456-6.
13. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. *53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-1818.
14. Tao F., Cheng J., Qi Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 3563–3576, DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.
15. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
16. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: a systematic literature review. *Computers in Industry*, 2021, vol. 130, DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.
17. Боровков А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // Цифровые Двойники. – СПб.: СПбПУ, 2019. – С. 234-245.
18. W3C OWL Working Group. OWL 2 web ontology language document overview (second edition). Available at: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (accessed: 06/24/2026).
19. Dermeval D., Vilela J., Bittencourt I.I. et al. Applications of ontologies in requirements engineering: a systematic review of the literature. *Requirements Engineering*, 2015, vol. 20, pp. 1-35, DOI: 10.1007/s00766-015-0222-6.
20. Siegemund K., Assmann U., Pan J., Thomas E., Zhao Y. Towards ontology-driven requirements engineering. *Proceedings of the 10th International Semantic Web Conference*, 2011.
21. Муртазина М. III. Система поддержки принятия решений при гибком подходе к инженерии требований на основе OWL-онтологии / М. III. Муртазина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 4. – с. 43-55. – DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-43-55.
22. Palantir Technologies. Ontology building overview. Available at: <https://www.palantir.com/docs/foundry/ontology/overview/> (accessed: 06/24/2026).
23. Microsoft. Adopting a DTDL-based industry ontology. *Azure Digital Twins documentation*. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/concepts-ontologies-adopt> (accessed: 06.24.2026).
24. DNV. Ontology engineering services. Available at: <https://www.dnv.com/services/ontology-engineering-services-199602/> (accessed: 06/24/2026).

25. OntoCommons. Siemens digital manufacturing. Available at: <https://ontocommons.eu/demonstrators/siemens-digital-manufacturing> (accessed: 06/24/2026).
26. GE News. GE launches the next evolution of wind energy making renewables more efficient, economic: the digital wind farm. Available at: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-launches-next-evolution-wind-energy-making-renewables-more-efficient-economic> (accessed: 06/24/2026).
27. McKinsey & Company. PLM systems and the digital twin journey. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-art-of-the-possible-in-product-development-and-beyond> (accessed: 06/24/2026).

Щукин Никита Игоревич. Младший научный сотрудник отдела Трубопроводных систем энергетики, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, niksha14@mail.ru, AuthorID: 1122536, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

UDC 004.94:621.311.245:004.82

DOI:10.25729/ESI.2026.43.3.010

Digital model of a digital twin of a wind power plant development using ontological modeling

Nikita I. Shchukin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, niksha14@mail.ru

Abstract. The paper addresses the problem of integrating heterogeneous mathematical models used in the formation of a digital model of a digital twin of a wind power plant. The relevance of the study is determined by the fact that a wind power plant is not a single computational object, but a complex technical system comprising a number of interrelated subsystems: a wind turbine, an aerodynamic circuit, a mechanical transmission, power electronics, an energy transmission system, a diesel power plant, battery energy storage systems, and consumers. For each of these subsystems, the scientific literature presents various classes of models that differ in terms of input data, level of detail, computational time step, adopted assumptions, constraints, and scope of applicability. In the development of a digital twin, such models should not only be implemented within a single software system, but also coordinated with one another in terms of parameter semantics, units of measurement, temporal characteristics, boundary conditions, and rules for transferring computational results. The aim of the study is to substantiate the feasibility of applying an ontological approach to model integration within the digital model of a digital twin of a wind power plant. It is shown that, in the absence of explicit formalization of the subject area, the increasing complexity of a digital twin is accompanied by data duplication, the emergence of implicit dependencies between computational modules, difficulties in maintaining the software system, and growing costs associated with the development of new functionality. An ontological model is proposed as a means of limiting these effects, defining a common layer of terms, relationships, constraints, and data requirements. It is advisable to apply such a model at the stage of designing new digital twin functionality, including the implementation of new computational models, modification of visualization components, database expansion, and refinement of relationships between subsystems. The novelty of the proposed approach lies in considering ontology not only as a means of representing knowledge about the subject area, but also as a tool for reducing organizational and software engineering risks in the integration of digital twin models. Particular attention is paid to the fact that an ontological model makes it possible to capture specialists' knowledge in a formalized form and thereby reduce the project's dependence on a limited number of employees who simultaneously possess expertise in software engineering, mathematical modeling, and the specific features of energy facilities. The paper substantiates that the use of an ontological approach can contribute to improving the consistency of digital model components, reducing the probability of errors in data exchange between computational modules, and simplifying the further development of the digital twin of a wind power plant.

Keywords: digital twin, wind power plant, mathematical modeling, ontological modeling, model integration

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project under the state assignment ESI SB RAS No. FWEU-2026-0007. The author expresses deep gratitude to Liudmila Vasilievna Massel for scientific guidance, valuable consultations and support provided during the research.

References

1. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, 2011, 617 p.
2. Yves-Marie S.-D., Romain B., Malte J. et al. A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions. *Renewable Energy*, 2020, pp. 754-768, DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.123.
3. Slootweg J., Haan S.W.H., Polinder H., Kling W.L. General model for representing variable-speed wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE Power Engineering Review*, 2002, vol. 18, pp. 144-151, DOI: 10.1109/MPER.2002.4311816..
4. Chinchilla M., Arnalte S., Burgos J. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, pp. 130-135, DOI: 10.1109/TEC.2005.853735.
5. Krause P., Wasynczuk, Sudhoff S., Pekarek S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013, 680 p.
6. Belsky A.A., Emelyanov E.A. Optimizatsiya parametrov avtonomnogo vetrodizelnogo kompleksa, ekspluatiruyemogo na gornyykh territoriyakh [Optimization of parameters of an autonomous wind-diesel complex operated in mountainous areas]. *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy [Sustainable Development of Mountain Territories]*, 2026, vol. 18, no. 1, pp. 69-80, DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-69-80.
7. Djohra S., Koussa M., Rennane A. et al. Hybrid diesel-wind system with battery storage operating in standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*, 2017, DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.127.
8. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 289-298, DOI: 10.3390/wevj3020289.
9. Gurevich Yu.E., Libova L.E. Primeneniye matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh ustoychivosti energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley [Application of mathematical models of electrical load in calculations of power system stability and reliability of power supply to industrial consumers]. Moscow, ELEKS-KM Publ., 2008, 248 p.
10. Arif A., Wang Z., Wang J. et al. Load modeling – a review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 5986–5999, DOI: 10.1109/TSG.2017.2700436.
11. Lehman M.M. Programs, life cycles, and laws of software evolution. *Proceedings of the IEEE*, 1980, vol. 68, no. 9, pp. 1060–1076, DOI: 10.1109/PROC.1980.11805.
12. Levén W., Broman H., Besker T., Torkar R. The broken windows theory applies to technical debt. *Empirical Software Engineering*, 2024, DOI: 10.1007/s10664-024-10456-6.
13. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. *53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-1818.
14. Tao F., Cheng J., Qi Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 3563–3576, DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.
15. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
16. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: a systematic literature review. *Computers in Industry*, 2021, vol. 130, DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.
17. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. Tsifrovyye dvoyniki: opredeleniye, podkhody i metody razrabotki [Digital twins: definition, approaches and development methods]. *Tsifrovyye dvoyniki [Digital Twins]*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2019, pp. 234-245.
18. W3C OWL Working Group. OWL 2 web ontology language document overview (second edition). Available at: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (accessed: 06/24/2026).
19. Dermeval D., Vilela J., Bittencourt I.I. et al. Applications of ontologies in requirements engineering: a systematic review of the literature. *Requirements Engineering*, 2015, vol. 20, pp. 1-35, DOI: 10.1007/s00766-015-0222-6.
20. Siegemund K., Assmann U., Pan J. et al. Towards ontology-driven requirements engineering. *Proceedings of the 10th International Semantic Web Conference*, 2011.
21. Murtazina M.Sh. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri gibkom podkhode k inzhenerii trebovaniy na osnove OWL-ontologii [Decision support system for flexible requirements engineering based on OWL ontology]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics]*, 2018, no. 4, pp. 43-55, DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-43-55.
22. Palantir Technologies. Ontology building overview. Available at: <https://www.palantir.com/docs/foundry/ontology/overview/> (accessed: 06/24/2026).

23. Microsoft. Adopting a DTDL-based industry ontology. Azure Digital Twins documentation. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/concepts-ontologies-adopt> (accessed: 06/24/2026).
24. DNV. Ontology engineering services. Available at: <https://www.dnv.com/services/ontology-engineering-services-199602/> (accessed: 06/24/2026).
25. OntoCommons. Siemens digital manufacturing. Available at: <https://ontocommons.eu/demonstrators/siemens-digital-manufacturing> (accessed: 06/24/2026).
26. GE News. GE launches the next evolution of wind energy making renewables more efficient, economic: the digital wind farm. Available at: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-launches-next-evolution-wind-energy-making-renewables-more-efficient-economic> (accessed: 06/24/2026).
27. McKinsey & Company. PLM systems and the digital twin journey. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-art-of-the-possible-in-product-development-and-beyond> (accessed: 06/24/2026).

Shchukin Nikita Igorevich. Junior Research Fellow of Pipeline Energy Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, niksha14@mail.ru, AuthorID: 1122536, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Статья поступила в редакцию 26.06.2026; одобрена после рецензирования 22.07.2026; принята к публикации 30.07.2026.

The article was submitted 06/26/2026; approved after reviewing 07/22/2026; accepted for publication 07/30/2026.